

Hochrepetierendes Lasersystem mit kompaktem Aufbau

Die Erfindung betrifft ein hochrepetierendes Lasersystem mit kompaktem Aufbau nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

5

Für viele Anwendungen, wie z.B. in der Biomedizin oder der Materialbearbeitung, werden hohe Intensitäten von Laserpulsen gefordert. Bei guter Strahlqualität ($M2 < 1.2$) und sub-500fs-Pulsen bedeutet dies in der Regel Pulsenergien im Bereich von 1-10 μJ , um die typischen Ablations- bzw. Bearbeitungsschwellenenergiedichten zu übertreffen und eine effiziente Prozessführung zu ermöglichen.

15 Im Bereich der Materialbearbeitung stellt ein Anwendungsbeispiel das Schreiben von beliebig und höchst präzise geformten Wellenleitern in Glas oder Plastik dar, wobei diese Technologie eine grosse Bedeutung für die zukünftigen Telekommunikationsnetzwerke besitzt.

20

Bedingt durch die kurze und effiziente Energieeinbringung (hauptsächlich durch Multiphotonenabsorption) sind bei Femtosekunden-Pulsen Nebenwirkungen thermo-mechanischer Art eher vernachlässigbar. Dies führt, zusammen mit einer Fokussierung zum Beugungslimit, zur erwähnten Präzision, und - bei medizinischen Anwendungen - auch zu Schmerzfreiheit. Sofern die Schwellwertenergiedichte erreicht wird ist weiterhin wichtig, dass der Prozess mit relativ hohen Wiederholraten bewerkstelligt werden kann, um
25 die Bearbeitungsgeschwindigkeit zu erhöhen.
30

Bisherige Lasergeräte, insbesondere solche mit wiederherstellbaren Verstärkern bzw. mit chirped pulse

BEST AVAILABLE COPY

regenerative amplification (CPA), erreichen zwar die nötigen Energien, sind jedoch oft durch die Grösse der nötigen Pulsstrecke/Kompressor-Einheit limitiert. Oftmals, wie bei Ti:Saphir-Systemen, kommt noch die Notwendigkeit eines teuren und voluminösen Pump-Lasers hinzu. Des weiteren wurden solche Systeme bisher meist nur mit Wiederholraten von typischerweise 10-20 kHz verwirklicht. Ausserdem bedingen die externen Komponenten, vor allem im Pulsstrecke, eine erhöhte Komplexität und erhöhten Aufwand für die Justage.

Lasersysteme mit einem wiederherstellbaren Verstärker nach dem Prinzip der Chirped Pulse Amplification sind beispielsweise aus der US 2003/0095320, sowie aus M. Pessot et al, „Chirped Pulse Amplification of a 300fs Pulse in an Alexandrite Regenerative Amplifier,“ IEEE J. Quantum Electron., QE-19, Seiten 61-66, 1989 oder H. Liu et al, „Directly diode-pumped Yb:KY(WO₄)₂ regenerative amplifiers,“ Opt. Lett. vol. 27, Seiten 722-724, 2002 bekannt. Diese Dokumente werden als durch Referenzierung in diese Anmeldung einbezogen betrachtet.

Eine grössere Kompaktheit des Aufbaus kann bei Systemen niedrigerer Pulsenergie erreicht werden, indem auf einen Pulsstrecke zur Streckung von Saat-Pulsen vor der Einkopplung in den wiederherstellbaren Verstärker verzichtet wird. Der Effekt der Pulsstreckung wird bei solchen Anordnungen durch die ohnehin gattungsgemäss vorhandenen Komponenten eines wiederherstellbaren Verstärkers bewirkt, wie z.B. durch Verstärkermedium, Pockels-Zelle, Viertelwellenlängenplättchen oder Dünnschichtpolarisator.

Ein solches Lasersystem des Stands der Technik ohne externen Pulsstreckener ist beispielsweise aus „A compact Ti:sapphire femtosecond pulse amplifier without stretcher at high repetition rate“, Guanghua Cheng, Lianjun Yu, 5 Yishan Wang, Qing Liu, Guofu Chen, Wie Zhao, Chinese Optics Letters, Vol. 1, No. 4, 20. April 2003, Seiten 225-227, bekannt, wobei dieses Dokument als durch Referenzierung in diese Anmeldung einbezogen betrachtet wird. In dieser Anordnung mit Ti:Saphir als Lasermedium wird auf einen 10 speziell ausgebildeten Pulsstreckener verzichtet, wobei die notwendige Pulsstreckung durch die dispersiven Einflüsse der Systemkomponenten der Kavität des wiederherstellbaren Verstärkers erfolgt. Eine nachfolgende Kompression wird durch zwei Prismenpaare bewirkt. Dabei wird ein Saftpuls 15 von weniger als 80 fs Dauer während aller Umläufe auf total 2,13 ps gestreckt. Die angegebene Pulsleistung beträgt 100 μ J. Zur Vermeidung von Beschädigungen des Lasermediums während der Verstärkungsphase von Saftpulsen wird der Saphir-Kristall ausserhalb des Fokus der konfokalen Kavität 20 platziert, so dass auch bei hohen Pumpleistungen keine Schädigungen auftreten. Jedoch führt dies mangels Verstärkung beim cw-Pumpen zur Notwendigkeit, den Verstärker gepulst zu pumpen, was wiederum niedrige Wiederholraten (\sim 1kHz) zur Folge hat.

25 Eine ähnliche Anordnung beschreibt „Femtosecond pulse amplification at 250 kHz with a Ti:sapphire regenerative amplifier and application to continuum generation“, T.B. Norris, Optics Letters, Vol. 17, No. 14, 15. Juli 1992, 30 Seiten 1009-1011, wobei dieses Dokument als durch Referenzierung in diese Anmeldung einbezogen betrachtet wird. Zur Erzielung von Pulsen mit einer Leistung von 1,7 μ J werden Saftpulse während der Umläufe in der Kavität

durch die Dispersion der Systemkomponenten auf ca. 10 ps gestreckt. Zur Kompression wird eine Folge von 6 Prismen verwendet. Auch bei diesem System besteht die Notwendigkeit für ein aufwendiges, voluminöses und teures Pump Laser System. Zudem müssen für das Schalten des Verstärkers zwei akusto-optische Modulatoren verwendet werden.

In „Ti:sapphire regenerative amplifier for ultrashort high-power multikilohertz pulses without an external stretcher“, Taiha Joo, Yiwei Jia, Graham R. Fleming, Optics Letters, Vol. 20, No. 4, 15. Februar 1995, Seiten 389-391, wird die Verwendung von zwei Prismenpaaren aus Flint-Glas innerhalb der Kavität beschrieben, die einen Saftpuls auf ca. 20 ps strecken, wobei dieses Dokument als durch Referenzierung in diese Anmeldung einbezogen betrachtet wird. Damit werden Pulse mit einer Repetitionsrate bis zu 5 kHz und mit einer Energie von 50 μ J pro Puls erreicht. Zur Kompression werden zwei Prismenpaare verwendet. In dieser Anordnung wird somit die Wirkung eines externen Pulsstreckers grosser Länge durch den wiederholten Durchgang eines gleichartigen Pulsstreckers innerhalb der Kavität ersetzt. Allerdings steht die Verwendung eines kavitätsinternen Prismenpaares einer weiteren Erhöhung der Kompaktheit des Verstärkers entgegen.

Die gattungsgemäßen Laseranordnungen des Stands der Technik sind hinsichtlich der erzielbaren Pulsstreckung durch die Materialdispersion der Systemkomponenten beschränkt bzw. erlauben durch ihren Aufbau mit internen Prismen keine hinreichende Kompaktheit.

Darüber hinaus wird die gewählte Auslegung bei pulsgepumpten Systemen durch das verwendete Lasermedium

Ti:Saphir begünstigt. Aufgrund des hohen Wirkungsquerschnitts von Ti:Saphir kann zur Erzielung des notwendigen Verstärkungsfaktors der Strahlquerschnitt gross gehalten werden, wobei zu hohe Intensitäten und damit
5 Materialschädigungen vermieden werden. Damit reicht auch die durch die Systemkomponenten bedingte Pulsstreckung aus, um unterhalb der kritischen Intensitätsschwelle zu bleiben. Zudem ist wegen der grossen Emissionsbandbreite von Ti:Saphir die dispersive Pulsstreckung nur minimal durch
10 die Verstärkungsfilterung inhibiert. Es bleibt jedoch die Dispersion abhängig von Systemkomponenten und nur wenig beeinflussbar. Für andere Materialien mit geringerem Wirkungsquerschnitt, wie z.B. Yb-gedopte Lasermedien, gelten diese Ausbildungsmöglichkeiten nicht mehr. Aufgrund
15 des kleineren Wirkungsquerschnittes muß der Strahlquerschnitt stärker fokussiert werden, so dass zur Vermeidung der Selbstfokussierung eine viel grössere Streckung des Pulses erforderlich wird oder die Pulsenergie typischerweise kleiner als etliche $10\mu\text{J}$ bleiben muß. Die im
20 Stand der Technik realisierten Laseranordnungen stellen damit eine in dieser Form speziell für das Lasermedium Ti:Saphir oder ähnliche Materialien realisierbare Lösungen dar oder würden in der Realisierung mit anderen, z. B. Yb-gedopten Lasermedien, zu den genannten Problematiken wie
25 mangelnde Kompaktheit oder hohe Komplexität führen.

Eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht in der Erweiterung des Bereichs verwendbarer Lasermedien für gattungsgemässe Lasersysteme als diodengepumpter
30 wiederherstellbarer Verstärker mit kompaktem Aufbau.

Eine weitere Aufgabe ist es, ein Lasersystem bereitzustellen, welches Laserpulse im Mikro-Joule-Bereich

mit einer Dauer kürzer als 400fs und einer Repetitionsrate grösser 50kHz bei kompaktem Aufbau erzeugt.

5 Eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht in der Bereitstellung eines Lasersystems, welches in diesem Bereich keine dynamischen Instabilitäten aufweist.

Eine weitere Aufgabe besteht in der Verringerung der Komplexität gattungsgemässer Lasersysteme als
10 wiederherstellbarer Verstärker.

Diese Aufgaben werden durch die Gegenstände des Anspruchs 1 oder der abhängigen Ansprüche gelöst bzw. die Lösungen weitergebildet.
15

Die Erfindung betrifft ein hochrepetierendes, kompaktes Lasersystem nach dem Prinzip des wiederherstellbaren Verstärkers, bei dem auf einen externen Pulsstreckeur zur Pulsstreckung verzichtet werden kann und das zusammen mit
20 der Verwendung von Lasermedien jenseits Ti:Saphir neue Gestaltungsfreiheiten von Lasersystemen erlaubt.

Erfindungsgemäss kommen breitbandige Laserverstärkermedien zum Einsatz, welche eine relativ lange Speicherzeit, z. B.
25 grösser als 1 ms, aufweisen. Als Beispiel dafür können Yb:Glas oder verschiedene Yb:Kristalle genannt werden, welche diodengepumpt werden können, so dass kompakte Anordnungen realisierbar sind. Typischerweise besitzen solchen Materialien einen recht geringen stimulierten
30 Wirkungsquerschnitt ($0.1 \dots 5e-20 \text{ cm}^2$), welcher allerdings wegen der langen Speicherzeit trotzdem zu annehmbaren Gewinnwerten führen kann, was vor allem bei Pumpquellen mit hoher Brillanz gegeben ist.

Zur Einkopplung von Saftpulsen in den wiederherstellbaren Verstärker kann ein - möglichst kompakter - fs-Puls-Oszillator verwendet werden, welcher Saat-Pulse geeigneter
5 Kürze zur Verfügung stellt und bezüglich der Wellenlänge mit dem aktiven Übergang im Verstärkermedium übereinstimmt. Eine geeignete Pulsdauer liegt beispielsweise bei $\tau_{FWHM} < 250\text{fs}$.

10 Als Treiber kann ein elektro-optisches Schaltelement verwendet werden, welches Wiederholraten von über 50kHz erlaubt. Im Gegensatz zu Anordnungen mit akusto-optischen Modulatoren genügt bei der Verwendung elektro-optischer Modulatoren ein einziges Element, so dass eine kompaktere
15 Bauweise möglich ist.

Zum Pumpen des Lasermediums eignet sich vorzugsweise eine Diodenpumpquelle hoher Brillanz.

20 Pulsstreckung und nachfolgende Kompression werden durch aufeinander abgestimmte Komponenten bewirkt, wobei jedoch auch die materialseitige Dispersion der übrigen Systemkomponenten genutzt bzw. in die Auslegung des Systems einbezogen werden kann. Als Pulsstreckener wird innerhalb der
25 Kavität eine speziell hierfür ausgelegte Komponente mit dispersiver Wirkung verwendet, deren Parameter eine erfindungsgemäss kompakte Auslegung des Lasersystems erlauben. Geeignete Komponenten stellen beispielsweise disperse Spiegel oder Blöcke aus hochdispersiven Medien,
30 wie z.B. SF57-Glas, dar. Dabei sollte ein günstiges Verhältnis der Dispersion 2. Ordnung (positiv) zur Dispersion 3.Ordnung (positiv) erreicht werden, d.h. eine

minimale Dispersion 3. Ordnung bei gleichzeitig maximaler Dispersion 2.Ordnung.

Der im Hinblick auf den Intra-Cavity-Pulsstreck-
5 ausgelegte Kompressor kann vorteilhaft unter Nutzung eines
dispersiven Gitters mit rel. geringer Linienzahl, z. B.
weniger als 1700 Linien/mm oder auch weniger als 1200
Linien/mm, ausgebildet werden, so dass auch hier eine
minimale positive Dispersion 3. Ordnung realisierbar ist.
10 Andererseits bestimmt der Wunsch nach Kompaktheit, dass die
Linienzahl nicht zu gering gewählt werden soll.

Das Lasersystem beruht in seiner Funktion auf dem chirped
pulse amplification (CPA)-Prinzip, welches jedoch in
15 einigen Punkten modifiziert bzw. weitergebildet wird.

Der Saat-Puls wird, im Gegensatz zum standardmässigen CPA,
nicht mittels eines externen Gitter-Pulsstreckers, z. B.
nach Martinez, verbreitert, sondern als fs-Puls oder auch
20 als ps-Puls mit einer Dauer von einigen 10 Pikosekunden in
den wiederherstellbaren Verstärker eingekoppelt.
Erfindungsgemäss kann somit ausserhalb der Kavität zwar
eine geringfügige Streckung, beispielsweise durch einen
Block dispersiven Materials, erfolgen, eine vollständige
25 Streckung erfolgt ausserhalb der Kavität nicht. Hingegen
wird dann innerhalb der Kavität mittels eines
hochdispersiven Elements, wie z.B. einem Block dispersiven
Materials oder einer Spiegel-Anordnung, der zunächst kurze
oder maximal vorgestreckte Puls mit jedem Umlauf
30 verbreitert. Dies führt dazu, dass bei nicht allzu hohen
Endenergien, z. B. $< 30 \mu\text{J}$, ein vernachlässigbares B-
Integral angesammelt wird und es nicht zur Zerstörung bzw.
Pulsverbreiterung durch Selbstphasenmodulation (SPM) kommt.

Nach erfolgter, insbesondere vollständiger, Verstärkung bzw. allen Umläufen in der Kavität liegen die typischen Pulsbreiten dann bei etlichen 10ps. Dies gilt typischerweise für transformationsbegrenzte Saftpulse von 5 150fs Dauer, wobei der Streckungsfaktor durch die zusätzlichen hochdispersiven Elemente im Resonator 3-10 mal grösser ist als mit ausschliesslich nativen Komponenten.

Eine hohe Pumpdiodenbrilliance führt im regenerativen 10 Verstärker zu einem relativ hohen Verstärkungsfaktor pro Umlauf (z. B. Kleinsignalgewinn $G_0 = 1.2 \dots 1.3$). Zudem wird durch die hohe Wiederholrate, sowie hohe Inversionslebensdauer und geringer stimulierter Wirkungsquerschnitt im Verstärkermedium dieses im quasi-cw 15 Modus bei relativ hohen Gewinnwerten gesättigt. Dies wird erreicht, indem eine möglichst geringe Umlaufzahl gewählt wird, typischerweise unter 100 Umläufen, um die benötigten Pulsenergien zu erreichen. Bei einer Systemauslegung mit zu hohem Gewinnwert kann andererseits die Umlaufzahl bei 20 gegebener Endenergie zu gering werden, was evtl. zur Zerstörung im Lasermedium führen kann, da der verstärkte Puls wegen mangelnder dispersiver Verbreiterung noch zu kurz ist.

25 Eine minimale Umlaufzahl im Verstärker garantiert auf der anderen Seite, dass die unkompensierte Dispersion 3. Ordnung, z. B. positive Dispersion bei einer Kombination von hochdispersivem Glasblock und Gitterkompressor, minimal bleibt und nach Kompression die minimale Pulsbreite nur 30 geringfügig durch Dispersion 3. Ordnung limitiert ist. Nicht zuletzt lässt sich durch die minimierten Einflüsse einer nur geringen Umlaufzahl auch ein sehr kompakter Kompressor verwirklichen.

Die Wahl eines erfindungsgemäss geeigneten Lasermediums mit langer Inversionslebensdauer hat zudem den Vorteil, dass sich der Verstärker bei den angestrebten Wiederholraten
 5 stabil und getreu der Ansteuerfrequenz in einem einzigen möglichen Ausgangsenergiezustand betreiben lässt, wobei dies unabhängig von der gewählten Umlaufzahl ist.

Die Materialdispersion innerhalb einer Kavität mit einem
 10 Element aus optischem Glas des Typs SF57 (z.B. der Firma Schott) wird in der Regel durch dieses Glas dominiert und ergibt sich beispielsweise gemäss:

$$\beta_2(\lambda) = 2 \frac{\lambda^3 \cdot l_{mat}}{2\pi c^2} \cdot \frac{d^2 n(\lambda)}{d\lambda^2} \quad (1)$$

$$15 \quad \beta_3(\lambda) = 2 \frac{\lambda^4 \cdot l_{mat}}{4\pi^2 c^3} \cdot \left(3 \cdot \frac{d^2 n(\lambda)}{d\lambda^2} \cdot \lambda \cdot \frac{d^3 n(\lambda)}{d\lambda^3} \right) \quad (2)$$

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{B_1 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - C_3}} \quad (3)$$

$$B_1 = 1,81651371$$

$$B_2 = 4,28893641 \cdot 10^{-1}$$

$$B_3 = 1,07186278$$

$$C_1 = 1,43704198 \cdot 10^{-2} \quad (4)$$

$$C_2 = 5,92801172 \cdot 10^{-2}$$

$$C_3 = 1,21419942 \cdot 10^2$$

Damit folgt beispielsweise für einen 50 mm langen Block aus
 20 SF57, in den jeweils unter Einhaltung der Brewster-Bedingung die Strahlung ein- und ausgekoppelt wird:

$$\begin{aligned}
\beta_2 / \text{Umlauf} &= 15174 \text{ fs}^2 \\
\beta_3 / \text{Umlauf} &= 12682 \text{ fs}^3 \\
\frac{\beta_2}{\beta_3} &= 1,196 \text{ fs}^{-1} \\
T_{\text{int}} &= 0,996 / 50 \text{ mm}, \quad \text{interne Transmission}
\end{aligned} \tag{5}$$

Für andere Glas-Typen ergeben sich dementsprechend als Werte:

5

- SF10

$$\begin{aligned}
\beta_2 / \text{Umlauf} &= 11408 \text{ fs}^2 \\
\beta_3 / \text{Umlauf} &= 10462 \text{ fs}^3 \\
\frac{\beta_2}{\beta_3} &= 1,09 \text{ fs}^{-1} \\
T_{\text{int}} &= 0,994 / 50 \text{ mm}, \quad \text{interne Transmission}
\end{aligned} \tag{6}$$

10

- BK7

$$\begin{aligned}
\beta_2 / \text{Umlauf} &= 2428 \text{ fs}^2 \\
\beta_3 / \text{Umlauf} &= 2634 \text{ fs}^3 \\
\frac{\beta_2}{\beta_3} &= 0,524 \text{ fs}^{-1} \\
T_{\text{int}} &= 0,996 / 50 \text{ mm}, \quad \text{interne Transmission}
\end{aligned} \tag{7}$$

Aus der durch das dispersive Element bewirkten Dispersion folgt eine Streckung eines $\text{sech}^2(1.763 \cdot t / \tau_{FWHM})$ Saat-Pulses mit $\tau_{FWHM} = 150 \text{ fs}$ innerhalb der Kavität gemäss:

15

$$\begin{aligned}
\Delta \tau / \text{Umlauf} &\cong \beta_2 / \text{Umlauf} \cdot \Delta \nu \cdot 2\pi \\
&= \beta_2 / \text{Umlauf} \cdot \frac{2\pi \cdot 0,315}{\tau_{FWHM}} \\
&= 15174 \text{ fs}^2 \cdot \frac{2\pi \cdot 0,315}{150 \text{ fs}} = 200 \text{ fs}
\end{aligned} \tag{8}$$

Darüber hinaus bewirken die weiteren Komponenten der Kavität, wie z.B. Pockels-Zelle, Lasermedium, Viertelwellenlängenplättchen oder Polarisator, zusätzliche
 5 dispersive Anteile von typischerweise ca. 4000fs^2 , so dass sich insgesamt eine Dispersion pro Umlauf von

$$\beta_2^{\text{total}} / \text{Umlauf} \cong 20000\text{fs}^2 \quad (9)$$

10 ergibt. Vernachlässigt man die, in diesem Fall der dispersiven Verbreiterung entgegenwirkende Verstärkerfilterung, so erreicht man nach einer Anzahl von 80 Umläufen eine totale Pulsstreckung von

$$15 \quad \Delta\tau_{80} = 80 \cdot 20000\text{fs}^2 \cdot \frac{2\pi \cdot 0,315}{150\text{fs}} = 21,1\text{ps} \quad (10)$$

Dem gegenüber stehen eine ohne SF57 erzielbare Dispersion von ca. 4000fs^2 , die dadurch erreichte Pulsverbreiterung von ca. 4.2 ps und die um den Faktor 5 vergrößerte
 20 Pulsintensität.

Zur Pulskompression stehen verschiedene Kompressor-
 ausgestaltungen zur Verfügung, die erfindungsgemäss auf die innerhalb der Kavität erfolgte Pulsstreckung abgestimmt
 25 werden. Ein Treacy-Kompressor als geeignetes Design zur nachfolgenden Pulskompression für eine solche kompakten Ausführungsform wird beispielsweise in Agrawal, G.P., Nonlinear Fiber Optics, Academic Press 1989, Seite 150, beschrieben.

30

Mit einer optischen Länge L_{opt} zwischen den Gittern des Kompressors, bzw. einer optischen Länge als der Strecke

zwischen der wiederholten Nutzung des gleichen Gitters, und der Gitterkonstante Γ mit $d=1/\Gamma$ folgt

$$\beta_2 = \frac{\lambda^3 \cdot L_{opt}}{2\pi \cdot c^2 \cdot d^2 \cdot \cos^2 \Theta}$$

$$\Theta = a \sin \left[\frac{\sin(\gamma) \cdot d - \lambda}{d} \right] \quad (11)$$

5

wobei Θ den Winkel zwischen der Normalen und dem ausfallenden Strahl auf dem Gitter angibt und γ für den Einfallswinkel auf das Gitter steht.

- 10 Für die oben erhaltenen Werte von $\beta_2 = 20000 \text{ fs}^2$ und einer Anzahl von 80 Umläufen muss eine Dispersion von

$$\beta_2^{Komp} = 80 \cdot 20000 \text{ fs}^2 = -1,6 \text{ ps}^2 \quad (12)$$

- 15 erreicht werden. Daraus folgt für die optische Länge:

$$L_{opt} = \frac{\beta_2 \cdot \pi \cdot c^2 \cdot d^2 \cdot \cos^2 \Theta}{\lambda^3}$$

mit

$$d = \frac{1}{\Gamma} = \frac{1}{1200 \cdot l/mm}$$

$$\lambda = 1,04 \mu m \quad (13)$$

$$\gamma = 50^\circ$$

$$\Theta = 28,8^\circ$$

$$\Rightarrow L_{opt} = 217 \text{ mm}$$

- Um eine dynamische Stabilität des erfindungsgemässen Lasersystems zu erhalten bzw. aufrecht zu erhalten, wird ein Lasermedium mit einer hohen Lebensdauer τ_L des oberen Niveaus verwendet.
- 20

Zur Berechnung der dynamischen Stabilität kann allgemein ein in der US 60/474,250 dargestellter Ansatz gewählt werden, der hiermit als vollständig in diese Anmeldung einbezogen betrachtet wird. Die numerische Lösung eines das
 5 System beschreibenden Differentialgleichungssystems für zwei Materialien mit unterschiedlichen Werten für τ_L führt zu folgenden Ergebnissen:

	Hohe Lebensdauer τ_L	Kurze Lebensdauer τ_L
λ	1040 nm	1040 nm
σ	$1 \cdot 10^{-24} m^2$	$125 \cdot 10^{-24} m^2$
ω_{gain}	75 μm	75 μm
τ_L	2000 μs	100 μs
g_0	0,262	1,64
T_R	13,33 ns	13,33 ns
l	2 %	2 %
E_{Seed}	0,5 nJ	0,5 nJ
$E_{Sättigung}$	3,4 mJ	27 μJ

10 Für beide Lebensdauern wurden die ausgekoppelten Energien als Funktion der Frequenz des Regenerativen Verstärkers für einen Bereich relevanter Gatelängen berechnet.

Damit kann durch die erfindungsgemäße Wahl und Abstimmung
 15 von diodengepumpten Lasermedium, Intra-Cavity-Pulsstrecke, Extra-Cavity-Kompressor und elektro-optischem statt akusto-optischem Schaltelement ein hochrepetierendes, kompaktes Lasersystem realisiert werden, das auch in Bereichen oberhalb von 250 kHz ein stabiles Verhalten aufweist und
 20 dessen Komponenten keiner Zerstörung durch zu hohe Intensitäten unterworfen sind.

Erfindungsgemässe Lasersysteme werden nachfolgend anhand von in der Zeichnung schematisch dargestellten Ausführungsbeispielen rein beispielhaft näher beschrieben.

5 Im einzelnen zeigen

- Fig.1 die Darstellung der Kavität eines Lasersystems nach dem Prinzip des wiederherstellbaren Verstärkers nach dem Stand der Technik;
- 10 Fig.2 die Darstellung der Kavität einer ersten Ausführungsform des erfindungsgemässen Lasersystems;
- 15 Fig.3 die Darstellung der Kavität einer zweiten Ausführungsform des erfindungsgemässen Lasersystems;
- 20 Fig.4 die Darstellung eines Pulskompressors für ein erfindungsgemässes Lasersystem;
- Fig.5 die Darstellung der Gesamtanordnung der ersten Ausführungsform des erfindungsgemässen Lasersystems;
- 25 Fig.6 die Darstellung der optischen Spektren von Saatpuls und verstärktem Puls für die erste Ausführungsform eines erfindungsgemässen Lasersystems;
- 30 Fig.7 die Darstellung der gemessenen Autokorrelation der verstärkten Pulse im Vergleich mit einer gerechneten Autokorrelation von idealen Pulsen

für die erste Ausführungsform eines
erfindungsgemässen Lasersystems;

5 Fig.8 die Darstellung von Berechnungsergebnissen für
die Stabilität der emittierten Energie in
Abhängigkeit von Gatelänge und Repetitionsrate
bei einer Speicherzeit 2 ms und

10 Fig.9 die Darstellung von Berechnungsergebnissen für
die Stabilität der emittierten Energie in
Abhängigkeit von Gatelänge und Repetitionsrate
bei einer Speicherzeit 100 μ s.

In Fig.1 wird die Kavität mit den gattungsgemässen
15 Systemkomponenten für ein Lasersystem nach dem Prinzip des
wiederherstellbaren Verstärkers nach dem Stand der Technik
dargestellt. Ein polarisierter Saat-Laserpuls von einer
Saat-Laserquelle wird über einen Polarisator 1 in die
Anordnung eingekoppelt und wird von einem Spiegel 4 nach
20 dem Durchgang durch einen elektrooptischen Modulator 3, wie
z.B. eine Pockels-Zelle, und ein Viertelwellenplättchen 2
reflektiert. In Abhängigkeit von der an den
elektrooptischen Modulator 3 angelegten Spannung wird die
Polarisationsebene des Laserstrahls gedreht, so dass der
25 Polarisator 1 passiert werden kann. Durch eine
entsprechende Schaltung können damit sowohl Pulse in die
Anordnung ein- als auch als Laserpuls S ausgekoppelt
werden. Der elektrooptische Modulator 3 bildet damit im
Zusammenspiel mit dem Polarisator 1 einen extern
30 steuerbaren Schalter, durch den ein Lichtpuls wahlweise
ein- und ausgekoppelt und die Resonatorgüte gesteuert
werden kann. Ist ein Puls eingekoppelt und damit innerhalb
des Resonators gefangen, wird er bei jedem Durchgang durch

das Lasermedium 6 verstärkt, wobei mehrfache Reflexionen an Faltspiegeln 5 erfolgt. Das Lasermedium 6 wird durch eine externe, hier nicht dargestellte, Laserdiodenquelle optisch gepumpt. Nach einer gewissen Anzahl von Resonatorumläufen und Durchgängen durch das verstärkende Lasermedium 6 wird der Puls durch eine erneute Rotation der Polarisierung durch Schalten des elektrooptischen Modulators 3 über den Polarisator 1 als Laserpuls S ausgekoppelt. Diese Anordnung stellt lediglich ein Beispiel für einen wiederherstellbaren oder regenerativen Verstärker dar.

In Fig.2 wird die in Fig.1 gezeigte Kavität der ersten Ausführungsform des erfindungsgemässen Lasersystems durch Einbringen eines dispersionsbeeinflussenden Elements als Pulsstrecke 7 modifiziert. In diesem Beispiel wird in den Strahlengang zwischen zwei Faltspiegel 5 ein Pulsstrecke 7 eingebracht, der als Block aus Glas des Typs SF57 ausgebildet ist. Um eine möglichst verlustfreie Einkopplung in den Pulsstrecke 7 zu erreichen, ist dieser mit zwei Brewster-Fenstern ausgebildet. Erfindungsgemäss können jedoch auch andere Elemente aus anderen Materialien, mit anderen Formgebungen oder an anderen Positionen verwendet werden. So können beispielsweise Gires-Tournois-Interferometer oder dispersive Schichtstrukturen anstelle eines der Faltspiegel 5 in Ergänzung oder als Alternative zu dem Pulsstrecke 7 aus einem dispersiven Glasblock platziert werden. Auch kann der Glasblock mit einer verspiegelten Seite ausgebildet werden, so dass dieser gleichzeitig die Funktion eines Faltspiegels 5 aufweist. Eine weitere Ausgestaltungsmöglichkeit ist durch die mehrfache Reflexion im Inneren des Glasblocks bzw. eines anderen dispersiven Mediums gegeben, die an einer

verspiegelten Fläche oder aber auch an der Grenzfläche zur Luft erfolgen kann.

Fig.3 zeigt die Darstellung der Kavität einer zweiten Ausführungsform des erfindungsgemässen Lasersystems. Das Grundprinzip entspricht dem in Fig.1 dargestellten Aufbau eines wiederherstellbaren Verstärkers. Ein polarisierter Saat-Laserpuls wird über einen Polarisator 1 in die Anordnung aus Viertelwellenplättchen 2, elektrooptischen Modulator 3 und Spiegel 4 eingekoppelt. Die Kavität wird nun durch Faltspiegel 5' und ein Lasermedium 6' in einer gegenüber Fig.1 oder Fig.2 veränderten Anordnung definiert. Als Pulsstreckter wird eine Kombination aus zwei reflektierenden Elementen 8a und 8b mit dispersiven Eigenschaften als Pulsstreckter verwendet, wobei die Flächen leicht gegeneinander geneigt sind, so dass ein eingestrahlter Puls mehrfach reflektiert und so mehrmals auf die Elemente 8a und 8b mit dispersiven Eigenschaften geführt wird. Neben einer allgemeinen Faltung des Strahlgangs in der Kavität kann hierdurch auch während eines einzigen Umlaufs eine häufige Wechselwirkung mit den dispersiven Elementen 8a und 8b und dadurch eine entsprechende Pulsstreckung erreicht werden. Wird der Winkel zwischen den reflektierenden Oberflächen der Elemente 8a und 8b verstellbar gestaltet oder der Einfallswinkel, z.B. mittels einem verstellbaren Einkoppelspiegel, verändert, so kann über die Zahl der Reflexionen auch die pro Umlauf erzielbare Dispersion und damit die Pulsstreckung variiert werden. Der Pulsstreckter ist hier lediglich aus Vereinfachungsgründen in einer einfachen Variante aus den zwei Elementen 8a und 8b dargestellt. Sowohl der Pulsstreckter als auch eine möglicherweise zur Einkopplung in den Pulsstreckter

verwendete Optik können jedoch auch noch durch weitere Elemente zur Strahlführung ergänzt werden. Gleichfalls kann der Pulsstreckter auch als ein monolithisches Element ausgebildet werden, bei dem eine Reflexion an zueinander geneigt ausgebildeten Grenzflächen erfolgt. Die dispersive Wirkung kann dann durch das Medium und/oder durch eine ggf. aufgebrachte reflektierende Schicht bewirkt werden. Ein zur Realisierung eines solchen Pulsstreckers mit multipler Reflexion geeignetes Konzept und dazugehörige Ausführungsformen werden in der US 60/442,917 beschrieben. Dieses Dokument wird als durch Referenzierung in diese Anmeldung einbezogen betrachtet.

In Fig.4 wird ein Pulskompressor nach dem Treacy-Design für ein erfindungsgemässes Lasersystem erläutert. Der aus dem wiederherstellbaren Verstärker ausgekoppelte Laserpuls S wird auf ein Gitter 9, z.B. mit einer Linienzahl von weniger als 1700 Linien/mm, vorzugsweise von ca. 1200 Linien/mm, geführt und von dort über einen Reflektor 10 mit zwei rechtwinkligen Spiegelflächen wieder auf das Gitter 9 und von dort auf einen rückreflektierenden Spiegel 11 geführt. Durch diesen Spiegel 11 erfolgt eine Strahlumkehr, so dass der Laserpuls S den Kompressor auf dem gleichen Weg nach einer in diesem Beispiel insgesamt viermaligen Wechselwirkung mit dem Gitter verlässt. In dieser Ausführungsform fällt der Laserpuls gegenüber der Flächennormalen des Gitters z. B. unter einem Winkel γ von 50° ein und wird unter einem Winkel Θ von $28,8^\circ$ reflektiert. Die für die Kompression relevante optische Länge zwischen zwei konsekutiven Gitterreflexionen beträgt, wie in der obigen Beispielrechnung gezeigt, nur ca. 217 mm.

Fig.5 zeigt die schematische Darstellung der Gesamtanordnung der ersten Ausführungsform des erfindungsgemässen Lasersystems. Neben dem bereits erläuterten Aufbau der Kavität sind die weiteren
5 Komponenten zur Erzeugung und Einkopplung von Saftpulsen und zur nachfolgenden Pulskompression dargestellt. Die einzelnen Komponenten sind wie folgt bezeichnet:

- 6'' Lasermedium
- 10 9 Gitter
- 10 Reflektor
- 11 Spiegel
- 12 Pulse-Delay-Generator und Hochspannungs-Versorgung für die Pockelszelle
- 15 13 Femtosekunden-Puls-Oszillator, 150 fs, 80 MHz, Leistung 250 mW, Wellenlänge 1040 nm
- 14 Spiegel
- 14' Spiegel
- 14'' Spiegel
- 20 PD Photodiode
- PC Pockelszelle
- PBS Polarisator
- TFP Dünnschicht-Polarisator
- M1 gekrümmter Spiegel
- 25 M2 gekrümmter Spiegel
- M3 gekrümmter Spiegel
- DM Dichroitischer Spiegel
- L1 Modematching Linse
- L2 Modematching Linse
- 30 Lc Optische Länge zwischen den Gitterreflexionen
- FR Faraday-Rotator
- $\lambda/2$ Halbwellenlängenplättchen
- $\lambda/4$ Viertelwellenlängenplättchen

In Fig.6 erfolgt die Darstellung der optischen Spektren von Saatspuls und verstärktem Puls für die erste Ausführungsform eines erfindungsgemässen Lasersystems.

5

Fig.7 zeigt die Darstellung der gemessenen Autokorrelation der verstärkten Pulse im Vergleich mit einer gerechneten Autokorrelation von idealen Pulsen für die erste Ausführungsform eines erfindungsgemässen Lasersystems.

10

Fig.8 zeigt die Darstellung von Berechnungsergebnissen für die Stabilität der emittierten Energie in Abhängigkeit von Gatelänge und Repetitionsrate bei einer Speicherzeit 2 ms.

15 Fig.9 zeigt die Darstellung von Berechnungsergebnissen für die Stabilität der emittierten Energie in Abhängigkeit von Gatelänge und Repetitionsrate bei einer Speicherzeit 100 μ s.

20 Fig.8 und Fig.9 zeigen das Auftreten von dynamischen Instabilitäten in Form von Bifurkationen für bestimmte Parameterkonstellationen von emittierter Energie, Repetitionsrate und Gatelänge. Durch geeignete Wahl von Parameterkombinationen, wie z.B. Gatelänge und Frequenz,
25 können erfindungsgemäss Instabilitäten vermieden und auch hochrepetierende Lasersysteme stabil betrieben werden. Geeignete Verfahren und Vorrichtungen zur Unterdrückung instabilen Verhaltens werden in der PCT/EP2004/005812 beschrieben.

Patentansprüche

1. Hochrepetierendes Lasersystem nach dem Prinzip des
wiederherstellbaren Verstärkers mit mindestens
5
 - einem verstärkenden Lasermedium (6),
 - einem Laserresonator mit mindestens einem
Resonatorspiegel (5) und mindestens einem Modulator
(3) und
 - einer Pumpquelle, insbesondere eine Laserdiodenquelle,
10 zum Pumpen des Lasermediums (6),
dadurch gekennzeichnet, dass
der Laserresonator einen Pulsstreckter (7,8a,8b) mit
struktur- und/oder materialbedingt hochdispersiver
Wirkung aufweist.
- 15 2. Hochrepetierendes Lasersystem nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, dass
der Pulsstreckter (7,8a,8b) eine minimale Dispersion 3.
Ordnung bei maximaler Dispersion 2. Ordnung aufweist.
- 20 3. Hochrepetierendes Lasersystem nach Anspruch 1 oder 2,
dadurch gekennzeichnet, dass
der Pulsstreckter (7) einen Block aus hochdispersivem
Material, insbesondere aus SF57-Glas, SF10-Glas oder
25 BK7-Glas, aufweist.
4. Hochrepetierendes Lasersystem nach Anspruch 3,
dadurch gekennzeichnet, dass
innerhalb des Blocks eine Mehrfachreflexion erfolgt,
30 insbesondere durch Reflexion an Grenzflächen.
5. Hochrepetierendes Lasersystem nach einem der
vorangehenden Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet, dass
der Pulsstrecke (8a,8b) ein Gires-Tornouis-
Interferometer oder eine dispersive Schichtstruktur,
vorzugsweise als Faltspiegel, aufweist.

5

6. Hochrepetierendes Lasersystem nach Anspruch 5,

dadurch gekennzeichnet, dass

der Pulsstrecke (8a,8b) wenigstens zwei reflektierende
Flächen aufweist, wobei die Flächen so angeordnet sind,
dass die Flächen

10

- gegeneinander und
- mit einem, insbesondere einstellbarem,
Öffnungswinkel

orientiert sind und der Laserstrahl an wenigstens einer
der Flächen wenigstens zweimal reflektiert wird.

15

7. Hochrepetierendes Lasersystem nach einem der
vorangehenden Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet, dass

das Lasermedium (6) eine Inversionslebensdauer grösser
als 1 ms besitzt, insbesondere Yb:Glas oder Yb:Kristall
ist.

20

8. Hochrepetierendes Lasersystem nach einem der
vorangehenden Ansprüche,

25

gekennzeichnet durch

einen Femtosekunden-Oszillator (13) zur Einkopplung von
Saftpulsen, wobei der Femtosekunden-Oszillator (13) so
ausgebildet und angeordnet ist, dass die Saftpulse beim
Einkoppeln in den Laserresonator Femtosekundenpulse oder
Pikosekundenpulse sind.

30

9. Hochrepetierendes Lasersystem nach einem der
vorangehenden Ansprüche,
gekennzeichnet durch
ein elektro-optisches Schaltelement als Modulator (3).
- 5
10. Hochrepetierendes Lasersystem nach einem der
vorangehenden Ansprüche,
gekennzeichnet durch
einen Pulskompressor ausserhalb des Laserresonators,
10 insbesondere nach dem Treacy-Design.
11. Hochrepetierendes Lasersystem nach Anspruch 10,
dadurch gekennzeichnet, dass
der Pulskompressor ein dispersives Gitter mit weniger
15 als 1700 Linien/mm, vorzugsweise weniger als 1200
Linien/mm, aufweist.

GEÄNDERTE ANSPRÜCHE

[beim Internationalen Büro am 12 April 2005 (12.04.05)eingegangen;
ursprüngliche Ansprüche 1-11 durch geänderte Ansprüche 1-11 ersetzt (3 Seiten)]

1. Lasersystem mit einer Repetitionsrate grösser 50 kHz
nach dem Prinzip des wiederherstellbaren Verstärkers mit
5 mindestens
 - einem verstärkenden Lasermedium (6),
 - einem Laserresonator mit mindestens einem
Resonatorspiegel (5) und mindestens einem Modulator
(3) und
 - 10 • einer Pumpquelle, insbesondere eine Laserdiodenquelle,
zum Pumpen des Lasermediums (6),
dadurch gekennzeichnet, dass
der Laserresonator einen Pulsstrecke (7,8a,8b) mit
struktur- und/oder materialbedingt hochdispersiver
15 Wirkung aufweist.
2. Lasersystem nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, dass
der Pulsstrecke (7,8a,8b) eine minimale Dispersion 3.
20 Ordnung bei maximaler Dispersion 2. Ordnung aufweist.
3. Lasersystem nach Anspruch 1 oder 2,
dadurch gekennzeichnet, dass
der Pulsstrecke (7) einen Block aus hochdispersivem
25 Material, insbesondere aus SF57-Glas, SF10-Glas oder
BK7-Glas, aufweist.
4. Lasersystem nach Anspruch 3,
dadurch gekennzeichnet, dass
30 innerhalb des Blocks eine Mehrfachreflexion erfolgt,
insbesondere durch Reflexion an Grenzflächen.
5. Lasersystem nach einem der vorangehenden Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet, dass
der Pulsstrecke (8a,8b) ein Gires-Tornouis-
Interferometer oder eine dispersive Schichtstruktur,
vorzugsweise als Faltspiegel, aufweist.

5

6. Lasersystem nach Anspruch 5,
dadurch gekennzeichnet, dass
der Pulsstrecke (8a,8b) wenigstens zwei reflektierende
Flächen aufweist, wobei die Flächen so angeordnet sind,
dass die Flächen

10

- gegeneinander und
- mit einem, insbesondere einstellbarem,
Öffnungswinkel

15

orientiert sind und der Laserstrahl an wenigstens einer
der Flächen wenigstens zweimal reflektiert wird.

20

7. Lasersystem nach einem der vorangehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
das Lasermedium (6) eine Inversionslebensdauer grösser
als 1 ms besitzt, insbesondere Yb:Glas oder Yb:Kristall
ist.

25

8. Lasersystem nach einem der vorangehenden Ansprüche,
gekennzeichnet durch
einen Femtosekunden-Oszillator (13) zur Einkopplung von
Saftpulsen, wobei der Femtosekunden-Oszillator (13) so
ausgebildet und angeordnet ist, dass die Saftpulse beim
Einkoppeln in den Laserresonator Femtosekundenpulse oder
Pikosekundenpulse sind.

30

9. Lasersystem nach einem der vorangehenden Ansprüche,
gekennzeichnet durch
ein elektro-optisches Schaltelement als Modulator (3).

10. Lasersystem nach einem der vorangehenden Ansprüche,
gekennzeichnet durch
einen Pulskompressor ausserhalb des Laserresonators,
5 insbesondere nach dem Treacy-Design.

11. Lasersystem nach Anspruch 10,
dadurch gekennzeichnet, dass
der Pulskompressor ein dispersives Gitter mit weniger
10 als 1700 Linien/mm, vorzugsweise weniger als 1200
Linien/mm, aufweist.

15

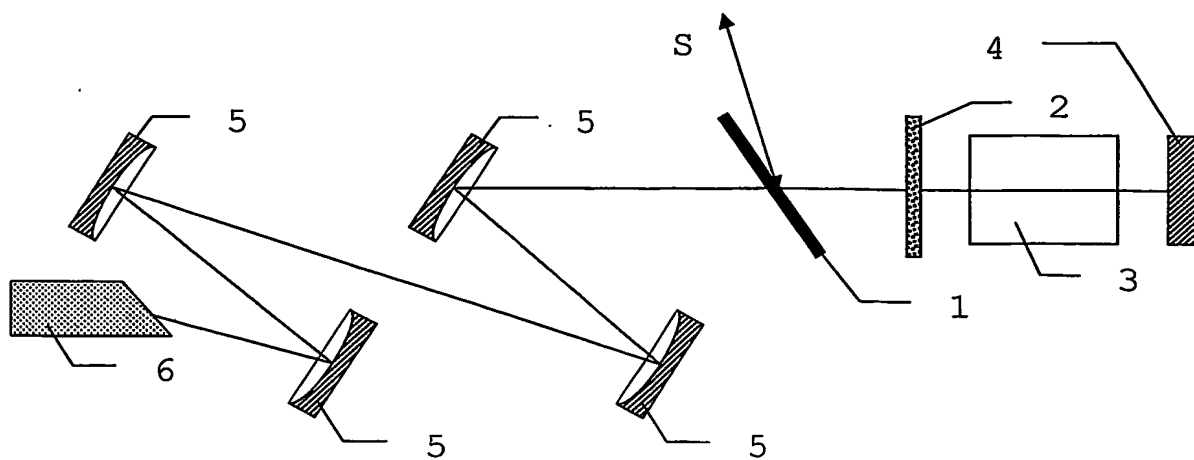


Fig. 1

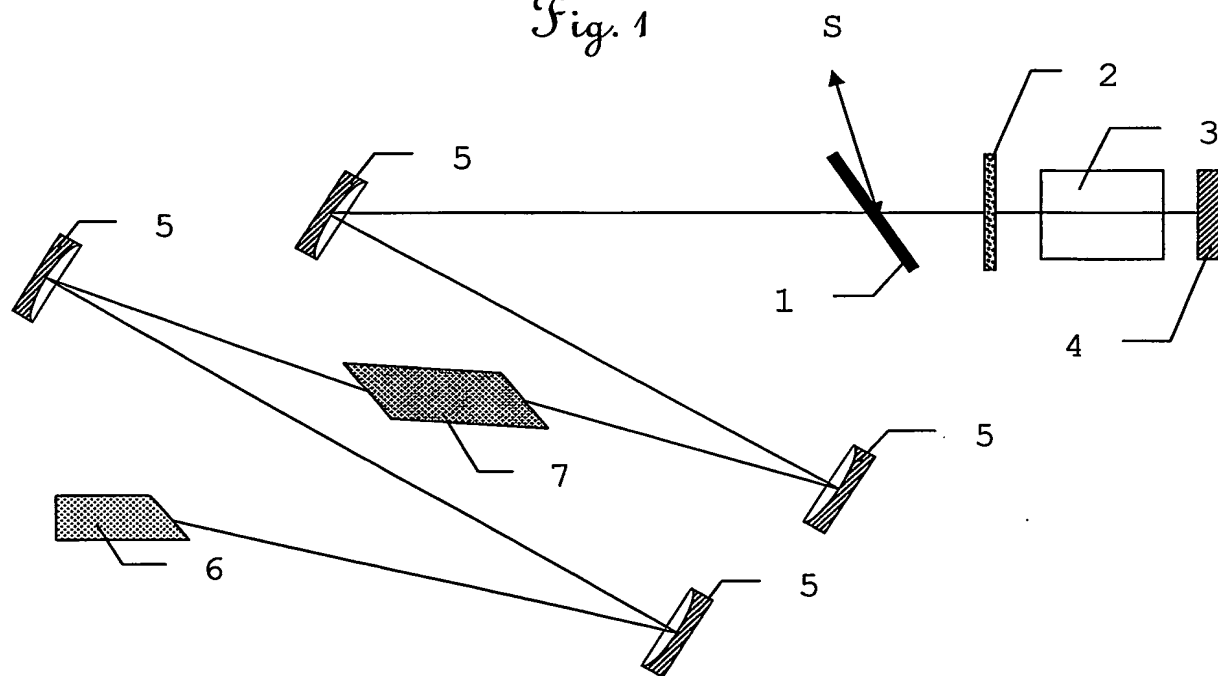
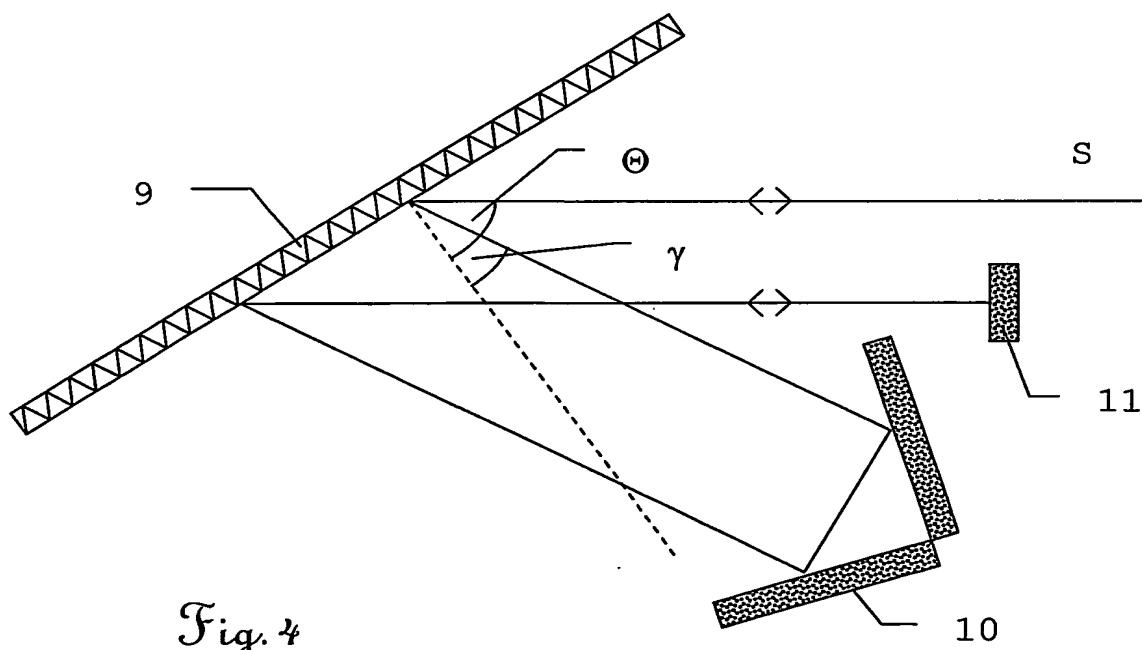
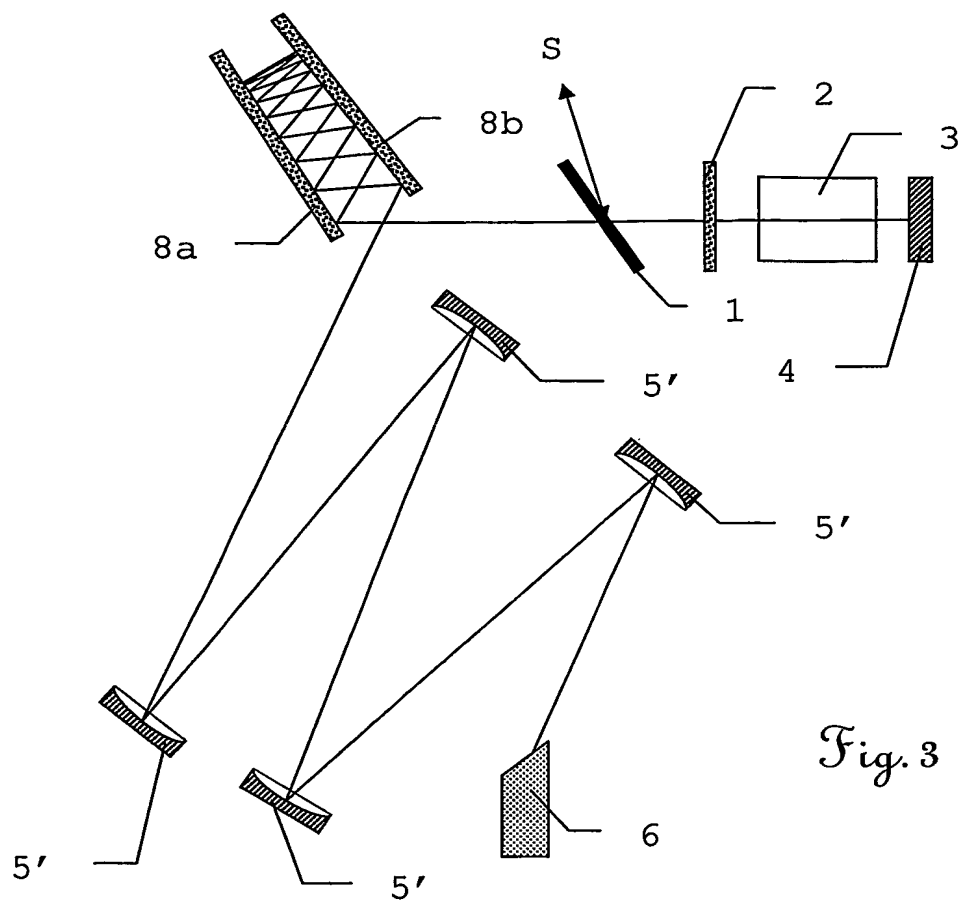


Fig. 2



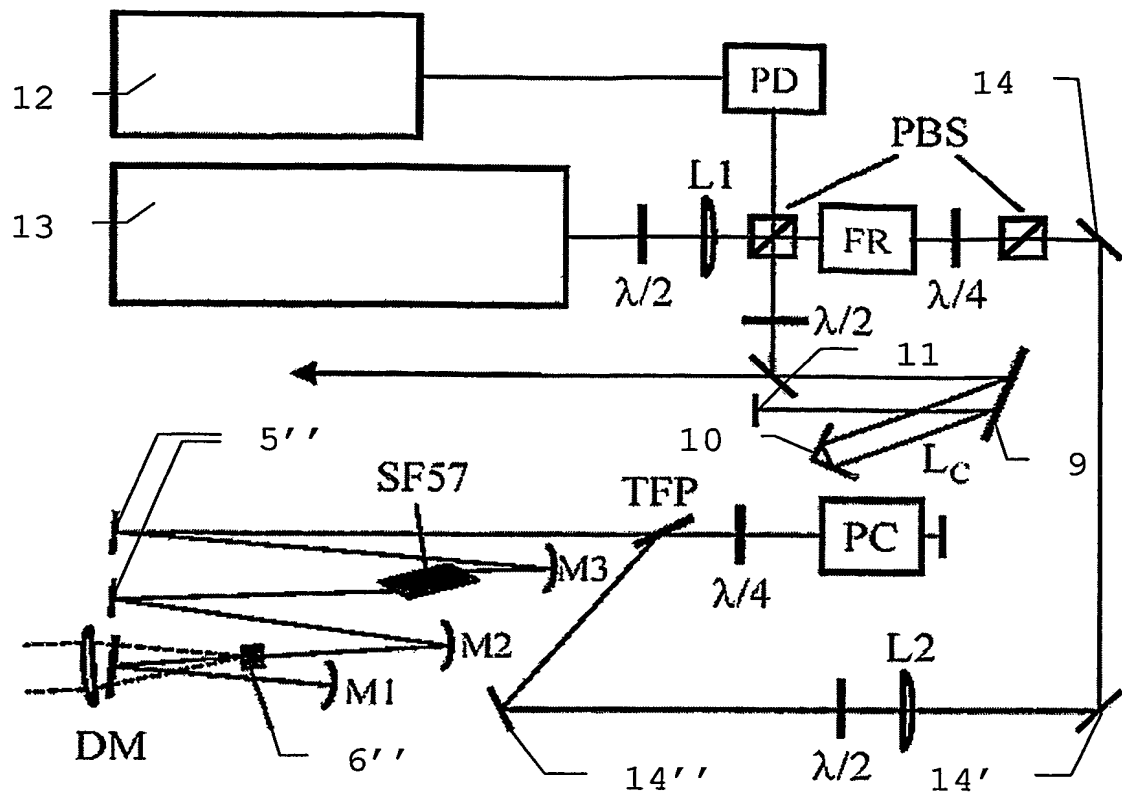


Fig. 5

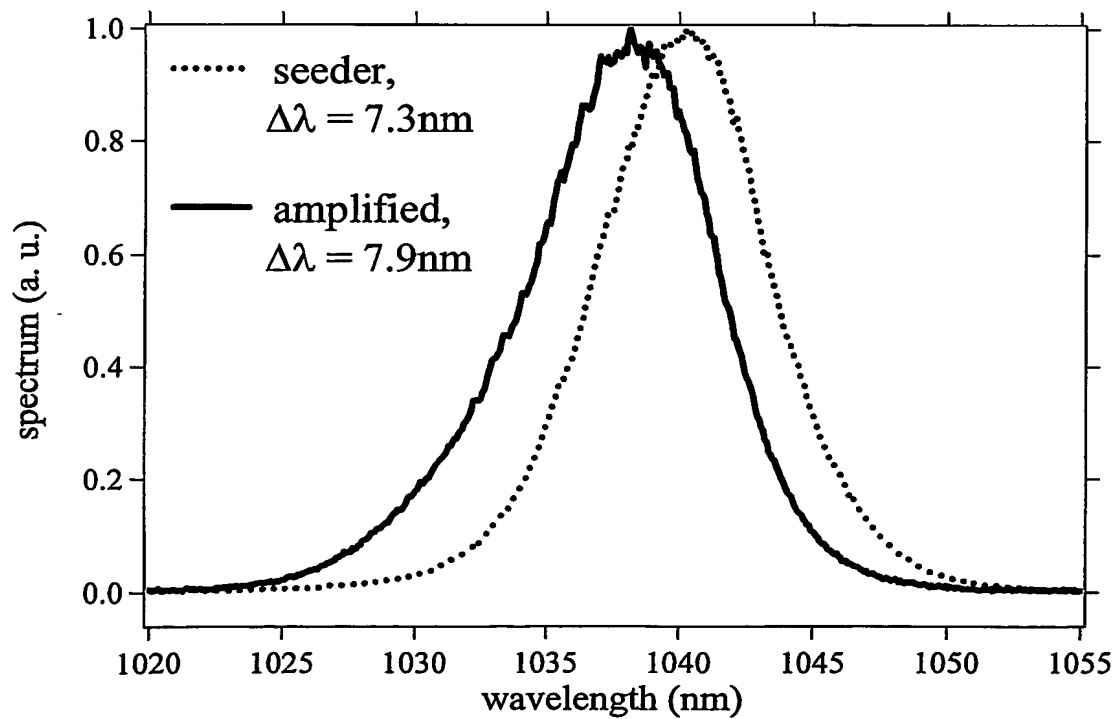


Fig. 6

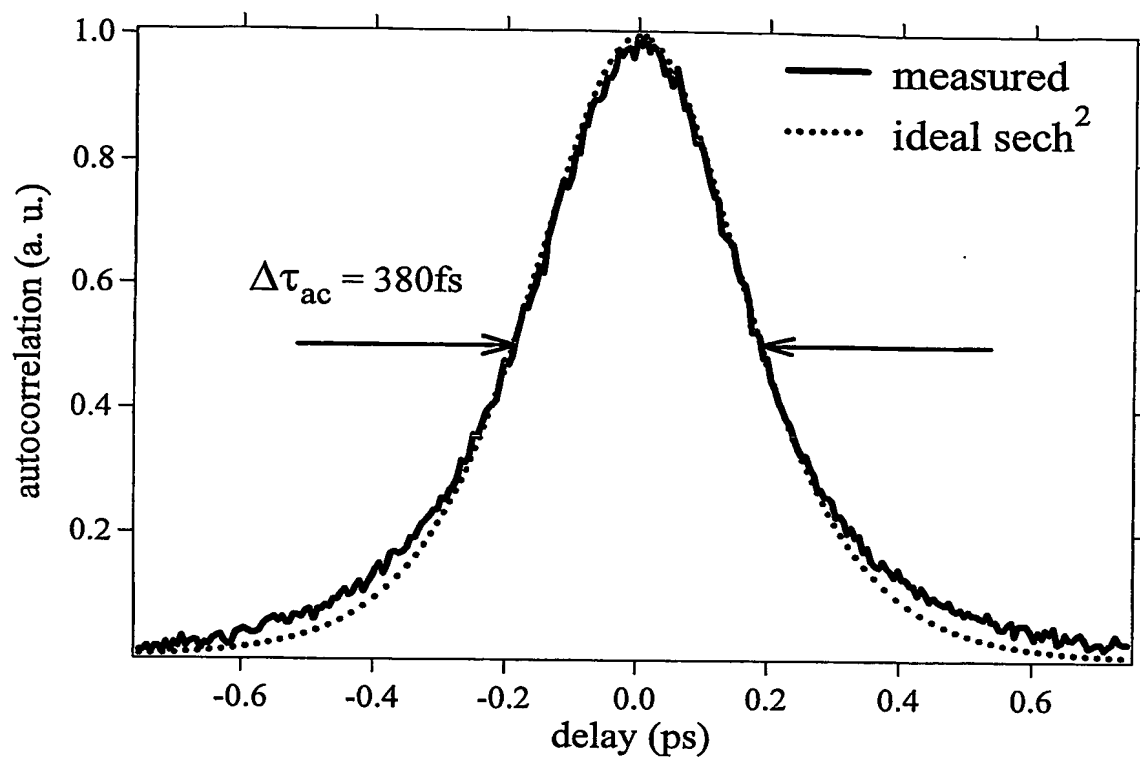


Fig. 7

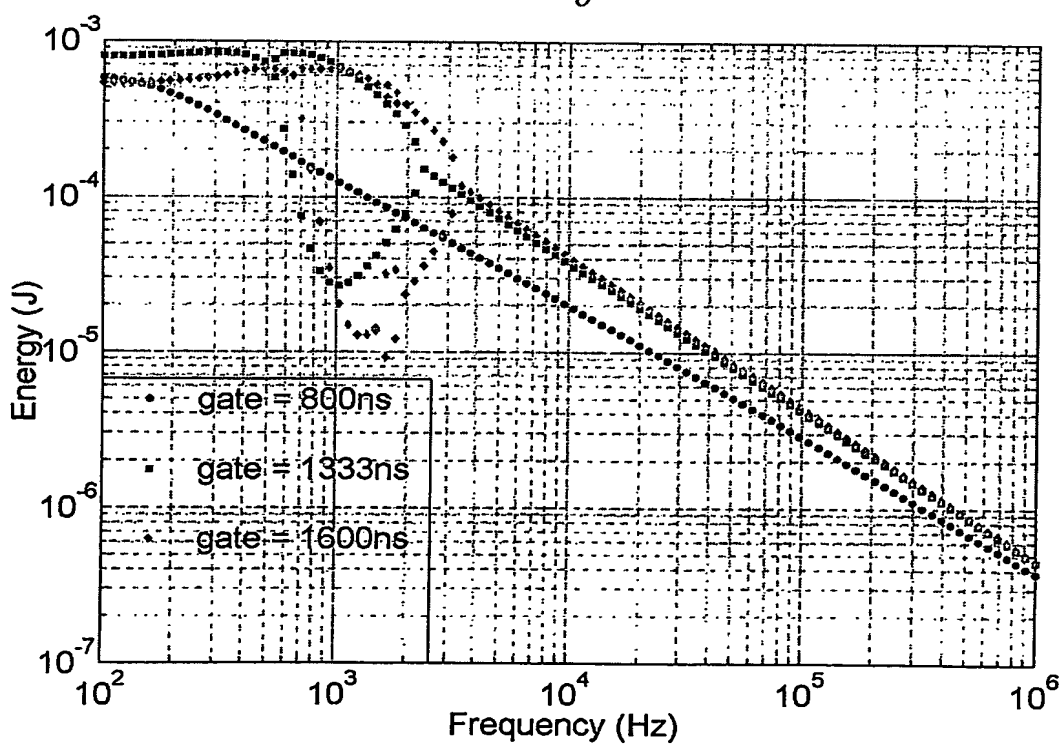


Fig. 8

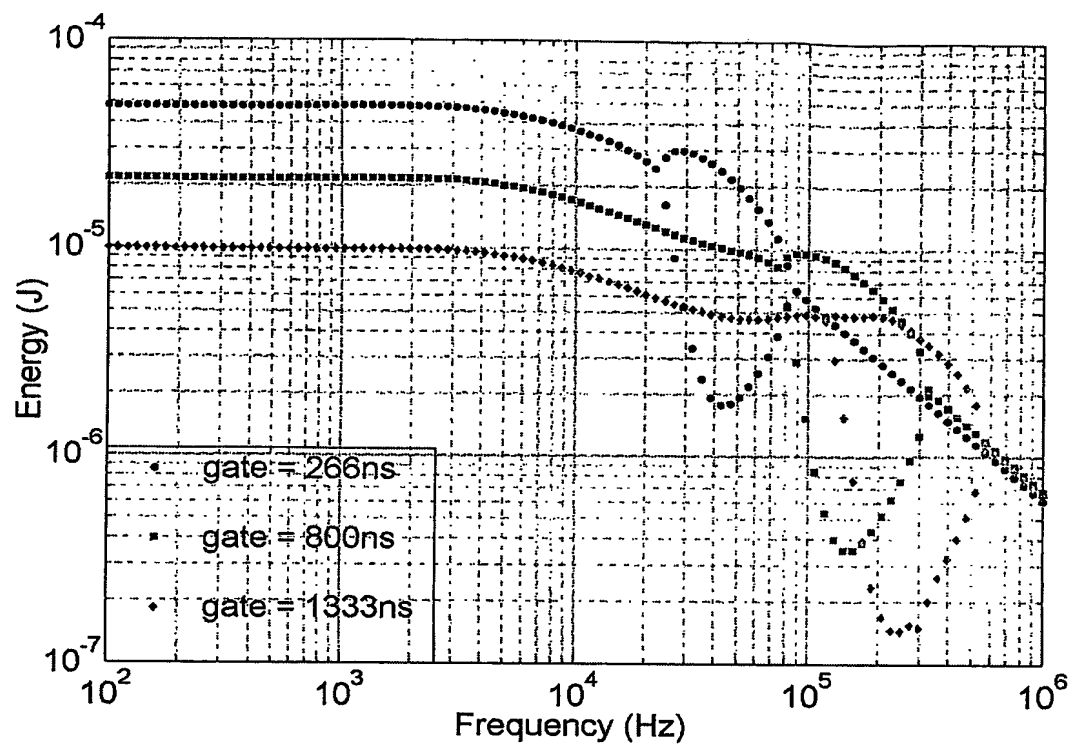


Fig. 9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/EP2004/013375

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 7 H01S3/081 H01S3/23

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
IPC 7 H01S

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the International search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC, COMPENDEX, IBM-TDB

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	DE 100 63 976 A1 (LZH LASERZENTRUM HANNOVER E.V) 4 July 2002 (2002-07-04) column 1, line 48 - column 4, line 15 column 4, line 67 - column 6, line 37 figures 1,4	1-11
X	GUANGHUA CHENG, LIANJUN YU, YISHAN WANG, QING LIU, GUOFU CHEN, WEI ZHAO: "A compact Ti:sapphire femtosecond pulse amplifier without stretcher at high repetition rate" CHINESE OPTICS LETTERS, vol. 1, no. 4, 20 April 2003 (2003-04-20), pages 225-227, XP009044763 CHINA cited in the application the whole document	1

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents :

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier document but published on or after the international filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
- "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

7 March 2005

Date of mailing of the international search report

16/03/2005

Name and mailing address of the ISA
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Sauerer, C

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/EP2004/013375

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	NORRIS T B: "FEMTOSECOND PULSE AMPLIFICATION AT 250 KHZ WITH A TI:SAPPHIRE REGENERATIVE AMPLIFIER AND APPLICATION TO CONTINUUM GENERATION" OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 17, no. 14, 15 July 1992 (1992-07-15), pages 1009-1011, XP000288964 ISSN: 0146-9592 cited in the application the whole document	1
X	JOO T ET AL: "TI:SAPPHIRE REGENERATIVE AMPLIFIER FOR ULTRASHORT HIGH-POWER MULTIKILOHERTZ PULSES WITHOUT AN EXTERNAL STRETCHER" OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 20, no. 4, 15 February 1995 (1995-02-15), pages 389-391, XP000491035 ISSN: 0146-9592 cited in the application the whole document	1
A	KAWANAKA F ET AL: "Q-switching operation with a diode-pumped cooled Yb:LiYF ₄ for chirped pulse regenerative amplification" CONFERENCE ON LASERS AND ELECTRO-OPTICS. (CLEO 2002). TECHNICAL DIGEST. POSTCONFERENCE EDITION. LONG BEACH, CA, MAY 19 - 24, 2002, TRENDS IN OPTICS AND PHOTONICS. (TOPS), WASHINGTON, WA : OSA, US, vol. VOL. 73, 19 May 2002 (2002-05-19), pages 404-404, XP010606879 ISBN: 1-55752-706-7 the whole document	1-11
A	EP 0 798 825 A (HAMAMATSU PHOTONICS K.K) 1 October 1997 (1997-10-01) column 10, line 40 - column 12, line 55 figure 1	1-11

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/EP2004/013375

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
DE 10063976	A1	04-07-2002	NONE	
EP 0798825	A	01-10-1997	JP 9260762 A	03-10-1997
			DE 69721888 D1	18-06-2003
			DE 69721888 T2	13-05-2004
			EP 0798825 A2	01-10-1997
			US 5815519 A	29-09-1998

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2004/013375

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
IPK 7 H01S3/081 H01S3/23

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchiertes Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
IPK 7 H01S

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC, COMPENDEX, IBM-TDB

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	DE 100 63 976 A1 (LZH LASERZENTRUM HANNOVER E.V) 4. Juli 2002 (2002-07-04) Spalte 1, Zeile 48 - Spalte 4, Zeile 15 Spalte 4, Zeile 67 - Spalte 6, Zeile 37 Abbildungen 1,4	1-11
X	----- GUANGHUA CHENG, LIANJUN YU, YISHAN WANG, QING LIU, GUOFU CHEN, WEI ZHAO: "A compact Ti:sapphire femtosecond pulse amplifier without stretcher at high repetition rate" CHINESE OPTICS LETTERS, Bd. 1, Nr. 4, 20. April 2003 (2003-04-20), Seiten 225-227, XP009044763 CHINA in der Anmeldung erwähnt das ganze Dokument ----- -/-	1

☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

☒ Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

A Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

E älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

L Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

O Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

P Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

T Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

X Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

Y Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

& Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

7. März 2005

Absenddatum des internationalen Recherchenberichts

16/03/2005

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Sauerer, C

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	NORRIS T B: "FEMTOSECOND PULSE AMPLIFICATION AT 250 KHZ WITH A TI:SAPPHIRE REGENERATIVE AMPLIFIER AND APPLICATION TO CONTINUUM GENERATION" OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, Bd. 17, Nr. 14, 15. Juli 1992 (1992-07-15), Seiten 1009-1011, XP000288964 ISSN: 0146-9592 in der Anmeldung erwähnt das ganze Dokument	1
X	JOO T ET AL: "TI:SAPPHIRE REGENERATIVE AMPLIFIER FOR ULTRASHORT HIGH-POWER MULTIKILOHERTZ PULSES WITHOUT AN EXTERNAL STRETCHER" OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, Bd. 20, Nr. 4, 15. Februar 1995 (1995-02-15), Seiten 389-391, XP000491035 ISSN: 0146-9592 in der Anmeldung erwähnt das ganze Dokument	1
A	KAWANAKA F ET AL: "Q-switching operation with a diode-pumped cooled Yb:LiYF ₄ for chirped pulse regenerative amplification" CONFERENCE ON LASERS AND ELECTRO-OPTICS. (CLEO 2002). TECHNICAL DIGEST. POSTCONFERENCE EDITION. LONG BEACH, CA, MAY 19 - 24, 2002, TRENDS IN OPTICS AND PHOTONICS. (TOPS), WASHINGTON, WA : OSA, US, Bd. VOL. 73, 19. Mai 2002 (2002-05-19), Seiten 404-404, XP010606879 ISBN: 1-55752-706-7 das ganze Dokument	1-11
A	EP 0 798 825 A (HAMAMATSU PHOTONICS K.K) 1. Oktober 1997 (1997-10-01) Spalte 10, Zeile 40 - Spalte 12, Zeile 55 Abbildung 1	1-11

INTERNATIONAL RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2004/013375

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
DE 10063976	A1	04-07-2002	KEINE		
EP 0798825	A	01-10-1997	JP	9260762 A	03-10-1997
			DE	69721888 D1	18-06-2003
			DE	69721888 T2	13-05-2004
			EP	0798825 A2	01-10-1997
			US	5815519 A	29-09-1998

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☒ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.